第 52 卷 第 7 期：3405-3416 高电压技术 Vol.52, No.7: 3405-3416
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250618

基于频域介电特性的油浸式变压器局部绝缘老化程度评估方法

张明泽[1]，邵　迪[1]，刘　骥[1]，程　嵩[1]，刘贺千[2]，池明赫[1]
（1. 哈尔滨理工大学工程电介质及其应用教育部重点实验室，哈尔滨 150080;
2. 国网黑龙江省电力有限公司电力科学研究院，哈尔滨 150030）

摘　要：油纸绝缘作为油浸式变压器的主要绝缘体系，承受了复杂、苛刻的运行工况，长期运行下变压器内部局部绝缘老化程度增加，绝缘性能下降，严重影响变压器的稳定安全运行，因此明确油浸式变压器局部绝缘老化状态的评估方法，对保障电网稳定运行至关重要。该文在实验室环境下针对变压器油、油浸纸板开展了不同温度下的频域介电响应测试，揭示了水分含量、绝缘老化程度、测试温度对其交流电导率变化的影响规律；同时，基于变压器高低压绕组主绝缘结构，构建了变压器主绝缘分布等效电导率计算模型，提出了基于介电响应数据自适应扩充的油浸式变压器局部绝缘老化状态评估方法，实现了多参数耦合方程组的求解，并通过不均匀老化缩比模型试验，验证了该方法的有效性。该研究结果可为电力部门运维决策提供一定的理论依据及技术参考。
关键词：油纸绝缘；交流电导特性；频域介电响应；优化算法；绝缘状态评估

Evaluation Method of Local Insulation Aging of Oil-immersed Transformers Based on Frequency Domain Dielectric Characteristics

ZHANG Mingze[1], SHAO Di[1], LIU Ji[1], CHENG Song[1], LIU Heqian[2], CHI Minghe[1]
(1. Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. Electric Power Research Institute, State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited, Harbin 150030, China)

Abstract：Oil-paper insulation, serving as the primary insulation system in oil-immersed transformers (OIT), endures challenging and severe operational environments. Under long-term operation, the aging of partial insulation inside the transformer increases, and the insulation performance decreases, which seriously impairs the stable and safe operation of the transformer. To maintain the stability of power grids, it is crucial to develop an accurate method for assessing the aging of localized insulation in OIT. In the conditions of laboratory, we conducted frequency domain dielectric response assessments on both transformer oil and oil-immersed pressboard under various temperature conditions to observe the effects. The impacts of moisture content, aging and test temperature on AC conductivity were revealed. Meanwhile, based on the transformers' main insulation structure, a calculation model of the distribution equivalent conductivity of the transformer main insulation is constructed. An evaluation method of local insulation aging of oil-immersed transformer based on adaptive expansion of dielectric response data is proposed. The multi-parameter coupled equations are solved and verify the validity of the approach through the uneven aging scale model tests. The study results can present a certain theoretical foundation and technical reference for the decision-making of operation and maintenance of power sector.
Key words：oil-paper insulation; AC conductivity characteristic; dielectric response in frequency domain; optimization algorithm; insulation condition assessment

0　引言

电力系统是现代经济发展的命脉，其安全稳定运行至关重要[1-2]。作为电力系统中不可或缺的核心设备，油浸式变压器承担着电能传输和转换的重任，其运行可靠性直接关系到电力系统供电稳定性[3-4]。然而，油浸式变压器长期运行在复杂工况下，其绝缘状态不可避免地受到电应力、热应力、机械应力、受潮等因素的影响[5]。且由于变压器内部温度分布

基金资助项目：国家自然科学基金(52307164)；黑龙江省自然科学基金(YQ2024E044)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52307164), Heilongjiang Provincial Nalural Science Foundation of China (YQ2024E044).

不均，致使局部绝缘老化程度下降异常明显，根据“木桶效应”，局部绝缘性下降是引发电力设备故障/停运的关键因素[6-7]。因此，如能够对油浸式变压器局部绝缘老化状态进行准确、有效的评估，对保障电力系统安全，提高供电可靠性具有极其重要的意义。

频域介电响应技术作为一种非破坏性检测技术，能够在较宽频范围内(10^{-4}~10^{4} Hz)表征绝缘材料/模型的介电特性变化规律[8-11]，特定频段内对绝缘材料中的老化、水分等问题具有极高的灵敏性[12-13]。近年来在油浸式电力设备(变压器、套管、互感器)绝缘状态评估中得到了广泛的关注和应用，逐渐成为评估油浸式电力设备绝缘状态的重要手段。

现阶段，关于油纸绝缘(oil-impregnated paper，OIP)频域介电响应的研究更多地倾向于通过测量OIP 材料在不同频率下的介质损耗因数、复介电常数，进而通过曲线变化规律对其老化程度、含水量进行评估，例如：1）根据损耗因数曲线，提取特征参数、特征频率段积分值、对导数值等信息，建立与 OIP 材料老化及水分的量化表征关系[14-15]；2）依据改进/修正的介电弛豫模型提取模型特征参数，模型中的参数均存在明确的物理含义，进而对 OIP 材料的绝缘状态进行分析[16]；3）通过测试损耗曲线深入研究分析 OIP 材料在不同频域范围内的电荷运动规律，揭示低频弥散、界面极化等介电过程的微观物理规律[17-18]。但上述方法在 OIP 体系绝缘状态评估中局限于材料本身，未能根据变压器实际物理结构建立相应的物理模型，且仅能对油浸式电力设备主绝缘的平均老化及受潮状态进行分析，从而使得上述评估方法的实际应用受到了极大的限制。

如上述分析可知，现有关于 OIP 材料/模型宽频介电特性的研究中，多考虑介质损耗因数与复介电常数特性变化，但相比之下，介质的交流电导行为能够表现绝缘介质劣化的信息量更加丰富。Hao J 等发现 OIP 的交流电导曲线斜率的变化与 OIP 材料内水分迁移特性、材料降解特性有直接关系[19]。在复交流电导中可分为虚部与实部两部分[20]，虚部表征电场的能量向电子的动能的转化过程，电子在外加交变电场的作用下做简谐振动使得总能量不变，而实部对应着实际电子运动过程中的能量耗散。Zukowski P 等对不同水分含量油浸纸板的交流电导特性进行了分析[21]，分别从电导活化能和弛豫活化能两个方面实现了对测试曲线的归算，研究发现电导率与频率的关系受到温度及偶极子弛豫时间的影响。

随着人工智能(artificial intelligence, AI)技术的飞速发展，电力设备的数字化与智能化逐步决定电力系统的未来发展方向，基于人工智能算法的前沿技术被广泛应用于电力设备运行状态的实时监测与智能诊断[22-25]。新型分析方法在传统方法的基础上，通过深度学习、数据挖掘和智能分析，显著提升了对设备复杂状态的评估与感知能力[26-28]。

基于此，本文在实验室的环境下，对不同老化/受潮程度的 OIP 材料，开展了宽频交流电导率测试，并采用主成分分析法、生成对抗网络对 OIP 试样的交流电导率数据进行扩充，基于变压器高低压绕组主绝缘结构，构建了变压器主绝缘分布等效电导率计算模型，提出了可表征局部绝缘介电特性的多参数耦合方程组，采用粒子群-遗传算法对多参数耦合方程进行迭代反演，获得变压器局部绝缘老化程度的量化评估。

1 交流电导率理论分析

对于介质的交流电导特性而言，全频段内包括极化电导行为及直流电导行为两部分组成[29]。当电场频率较低时，介质内的载流子定向迁移，响应电流主要由直流电导电流构成；随着激励电场频率的增加，介质内部的松弛极化行为对响应电流的贡献逐渐增加，此部分电流主要由极化电流构成。

介质的复交流电导率实部与虚部分量可通过复介电常数实部与虚部进行计算[19]：

$$\begin{cases}\sigma'(\omega,T)=\gamma_0+g=\omega\varepsilon_0\varepsilon''(\omega,T)\\ \sigma''(\omega,T)=\omega\varepsilon_0\varepsilon'(\omega,T)\end{cases} \tag{1}$$

式中：γ_0表征交流电导率中的直流分量，S/m；g 表征交流电导率中的极化分量，S/m。由于后文中仅考虑了交流电导率实部$\sigma'(\omega,T)$，为叙述方便简称为 RPAC。

式(1)中仅在介质内考虑了单一的松弛过程，以此进行极低频激励下 RPAC 将小于直流电导率[30]。而实际介质内存在多个多松弛过程时，式(1)应进一步表示为：

$$\begin{cases}\varepsilon'_{\mathrm{f}}=\varepsilon_\infty+(\varepsilon_{\mathrm{s}}-\varepsilon_\infty)\int_0^\infty\dfrac{f(\tau)}{1+\omega^2\tau^2}\mathrm{d}\tau\\ \varepsilon''_{\mathrm{f}}=(\varepsilon_{\mathrm{s}}-\varepsilon_\infty)\int_0^\infty\dfrac{f(\tau)\omega\tau}{1+\omega^2\tau^2}\mathrm{d}\tau\end{cases} \tag{2}$$

式中：$f(\tau)$为松弛时间 τ 的概率分布函数。

由于松弛时间 τ 的概率分布函数 $f(\tau)$无法确定，因此需采用其他方法对 RPAC 进行修正。本文前期研究中，采用频温及电导双平移方式，可得到极低频下介质材料的 RPAC[29]。由于极低频电导率与直流电导率应相同，根据式(3)可得到多松弛过程下的频率修正系数$(1-\alpha)$，修正 RPAC 的计算模型为式(4)。

$$1-\alpha=\lg(\frac{\gamma}{\gamma_0})/\lg(\omega)+1 \tag{3}$$

$$g=\omega^{(1-\alpha)}\varepsilon_0(\varepsilon^n-\frac{\gamma}{\omega^{(1-\alpha)}\varepsilon_0}) \tag{4}$$

2　分布式变压器主绝缘等效介电弛豫模型构建

与复介电常数及损耗因数相比，交流电导中包含了弛豫活化能及电导活化能两部分。电导活化能的变化(电导率 e 指数变化)与其内部水分含量及老化程度密切相关，可直接表征介质内离子跃迁时所需克服势垒高度的变化。因此本文采用 RPAC 构建变压器主绝缘等效电导模型结合数学计算可有效评估其绝缘状态。

在变压器长期运行时，内部 OIP 发生的电老化的影响较小(局部由于电场畸变/集中产生的电老化暂不考虑)[16]，因此运行温度是 OIP 老化的最主要原因。本文根据文献[31]对运行 50 年的油浸式电力变压器进行拆解得到的各绝缘层实际老化试验结果，采用国标 GB/T 1094 中提出的变压器绕组温度分布计算方法，明确了主绝缘中非均匀老化的分布特征。结合现有的多物理场仿真计算结果可知[32]，绕组热点温度出现在主绝缘轴向高度的 88%~92%之间，因此本文在试验模型设计中在轴向上将非均匀老化模型分为 8%、4%(热点温度区域)、88% 3 段。且由于铁芯发热和变压器油流，靠近低压绕组的内部绝缘劣化最为严重，劣化程度向外逐渐减小。根据上述油浸式变压器老化规律，将比例模型的主绝缘层划分为 9 个独立的部分(如图 1 所示)，每个部分在不同的老化周期下进行加速热老化试验。

由于变压器高低压绕组间主绝缘在不同空间位置处的老化程度不同，在进行非均匀老化等效介电弛豫模型构建时，需将主绝缘结构进行轴向、径向分段式划分，为了简化分析，本文以轴向 3 段、径向 3 个 OIP 单元(油隙-隔板-撑条为一个 OIP 单元)的非均匀老化主绝缘模型为例，主绝缘分段模型如图 1 所示。

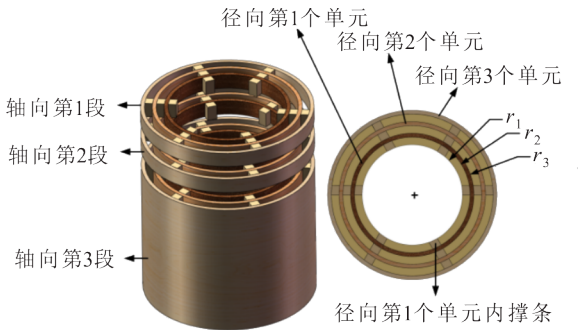


图 1　非均匀老化主绝缘等效模型示意图

Fig.1　Schematic diagram for the equivalent model of NUA main insulation

由于轴向高度对体积比无影响，各段径向第 n 层绝缘内油隙体积与整体体积之比为：

$$Y_n=1-\frac{3m}{\pi r_{2n-1}} \tag{5}$$

式中：m 为撑条宽度；r_{2n-1} 为第 n 层油隙内径。

轴向第 1 段、径向第 1 个单元中撑条的绝缘电阻可表示为：

$$R_{ct11}=(1-Y_1)\int_{r_1}^{r_2}\frac{\mathrm{d}r}{\frac{1}{3}\pi r l_1\gamma_{11}}=(1-Y_1)\frac{3\ln\frac{r_2}{r_1}}{\pi n_1 L\gamma_{11}} \tag{6}$$

式中：γ_{11} 为轴向第 1 段、径向第 1 个单元中隔板/撑条的 RPAC。

轴向第 1 段、径向第 1 个单元中隔板绝缘电阻可表示为：

$$R_{gb11}=\int_{r_2}^{r_3}\frac{\mathrm{d}r}{\frac{1}{3}\pi r l_1\gamma_1}=\frac{3\ln\frac{r_3}{r_2}}{\pi n_1 L\gamma_{11}} \tag{7}$$

式中：r_3 为径向第 2 个 OIP 单元中油隙的内径。

轴向第 1 段、径向第 1 个单元的绝缘电阻：

$$R_{11}=\frac{1}{\pi n_1 L}\left(\frac{\beta_1(\gamma_{11}Y_1+\gamma_0(1-Y_1))+\gamma_{11}\alpha_1Y_1(1-Y_1)}{\gamma_{11}(\gamma_{11}Y_1+\gamma_0(1-Y_1))}\right) \tag{8}$$

式中：α_1 为 $\ln r_2-\ln r_1$；β_1 为 $\ln r_3-\ln r_2$。

轴向第 n 段、径向第 n 个单元的绝缘电阻为：

$$R_{nn}=\frac{1}{\pi(1-n_1-n_2-n_{n-1})L}\cdot\left(\frac{\beta_n(\gamma_{nn}Y_n+\gamma_0(1-Y_n))+\gamma_{nn}\alpha_nY_n(1-Y_n)}{\gamma_{nn}(\gamma_{nn}Y_n+\gamma_0(1-Y_n))}\right) \tag{9}$$

式中：n_1 为轴向第 1 段绝缘高度占总高度的比例；n_2 为轴向第 2 段绝缘高度占总高度的比例；n_{n-1} 为轴向第 $n-1$ 段绝缘高度占总高度的比例；α_n 为

$\ln r_{n+1}-\ln r_n$；β_n 为 $\ln r_{n+2}-\ln r_{n+1}$。

可得主绝缘模型的 RPAC 可表示为：

$$\gamma=\frac{\ln\frac{r_{2n+1}}{r_1}}{6\pi LR}=\frac{\ln\frac{r_{2n+1}}{r_1}}{6}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{n_1p_{1i}}{q_{1i}}+\frac{n_2p_{2i}}{q_{2i}}+\cdots+\frac{(1-n_{1\ldots}-n_{(n-1)})p_{ni}}{q_{ni}}\right) \tag{10}$$

式中：q_{1i}为轴向第 1 段、径向第 i 个单元的复合电阻公式中括号部分的分子；p_{1i}为轴向第 1 段、径向第 i 个单元的复合电阻公式中括号部分的分母；q_{2i}为轴向第 2 段、径向第 i 个单元的复合电阻公式中括号部分的分子；p_{2i}为轴向第 2 段、径向第 i 个单元的复合电阻公式中括号部分的分母；q_{ni}为轴向第 n 段、径向第 i 个单元的复合电阻公式中括号部分的分子；p_{ni}为轴向第 n 段、径向第 i 个单元的复合电阻公式中括号部分的分母。

3 试验及结果分析

3.1 试验平台搭建及试验设计

本文开展了 130 ℃加速热老化试验及绝缘受潮试验，制备了不同老化及受潮程度的 OIP 试样。

使用 IEC 标准 60450 中的黏度平均聚合度法可获得油浸纸板的聚合度(DP)。对不同老化时间的油浸纸板进行脱脂处理，研磨后将 0.1 g 样品与 25 mL 铜乙二胺溶剂和 25 mL 去离子水混合，使用乌氏黏度计测试样品的比黏度[29]。不同老化条件下油浸纸板 DP 试验结果见表 1。

表 1 油浸纸板聚合度测试结果

Table 1 Test results of DP for OPI samples

老化天数/d	0	5	10	30	35
DP	1 001	852	656	464	342

水分含量测试的具体步骤如下：(1)将试样放置在 75 ℃恒温箱中进行吸潮处理；(2)将试样剪碎，用电子天平称取 3 g 并混入 40 mL 甲醇；(3)采用卡尔费休库伦法水分测试仪对油浸纸版进行含水率测试。结果如表 2 所示。

表 2 油浸纸板含水率测试结果

Table 2 Test results of moisture content for OPI samples

条件	含水率/%			
	未受潮	一次受潮	二次受潮	三次受潮
老化 0 d	0.87	1.80	3.20	5.27
老化 5 d	1.13	1.58	3.25	5.25
老化 35 d	1.27	1.82	3.31	5.12

为了获得 OIP 试样的频域介电特性及直流电导率，本文搭建介电特性测试平台如图 2(a)所示。采用美国 Keithley 公司生产的 6517B 静电计，可提供飞安(10^{-15} A)级的电流测量精度，实现绝缘材料的极化电流过程测试，获得长松弛时间下的直流电导率。采用美国 Megger 公司生产的 IDAX-300 测试仪，可分别对油浸纸板、变压器油进行频域介电响应测试，获得 30、60、90 ℃测试温度下的 FDS 曲线，测试频率范围在 10^{-3}~10^{3} Hz。

同时，为了模拟变压器主绝缘实际的老化状态，本文以 110 kV 油浸式电力变压器内部绝缘结构为参考。构建可拆卸缩比模型测试平台，如图 2(b)所示。为了保证实验室试验的可行性，缩比模型的主绝缘厚度保持不变，只减少绕组高度。图 2(b)中高压端与变压器缩比模型高压绕组相连接，外接 IDAX-300 的电压输出端。低压端与变压器缩比模型低压绕组相连接，外接 IDAX-300 的测试端。本文对该缩比模型进行 FDS 测试，以此试验结果验证后续评估方法的准确性。

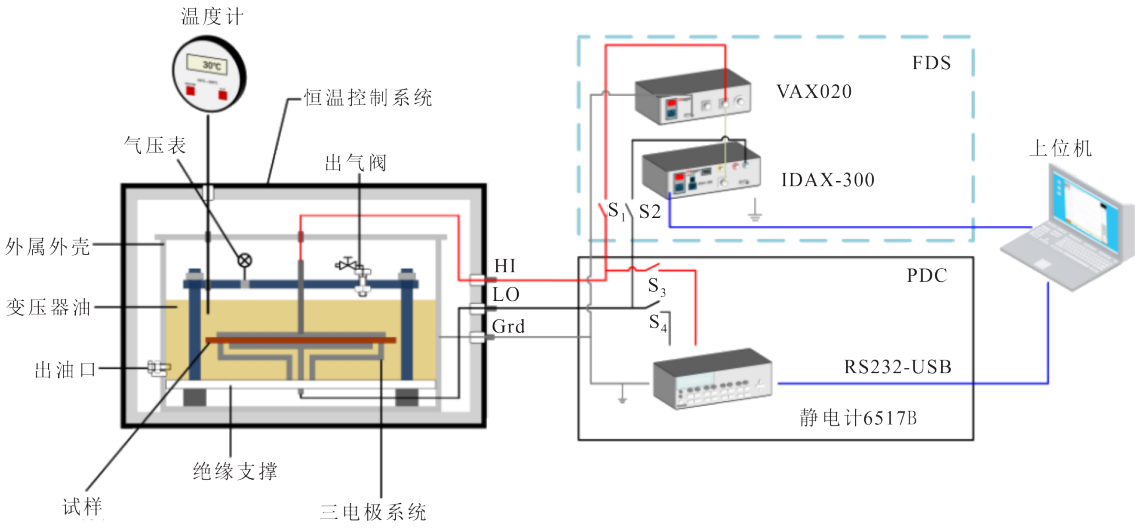
本课题组在先前对与上述缩比模型相同厚度的油纸绝缘材料组成的 XY 模型进行研究[33]，发现不同比例的 XY 模型理论计算曲线与实测曲线在全频段均能准确拟合，说明该尺寸、厚度结构较小的模型，其产生的油纸界面效应对测试结果影响不明显。

3.2 变压器油交流电导特性变化规律

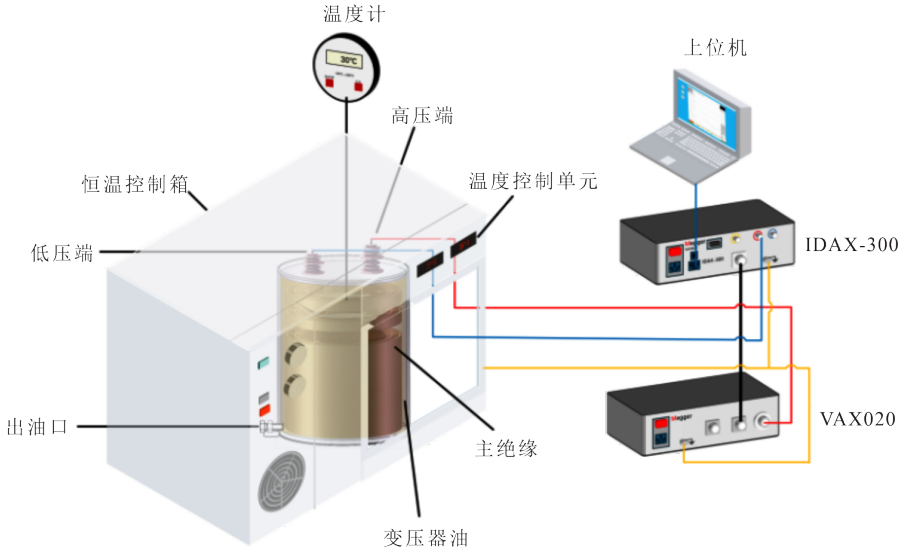
为了建立变压器油频域介电特性的基础数据库，本文在不同测试温度下(30、60、90 ℃)对变压器油进行频域介电响应测试及直流电导率测试。

根据频温平移和电导平移，能有效扩展 RPAC 曲线的低频范围(如参考文献[29]中式(8)、(9))，平移曲线如图 3 所示。不同老化程度变压器油的直流电导率，及极低频 RPAC 如表 3、4 所示，结合式(4)，可获得修正计算的 RPAC 曲线如图 4 所示。后续的 RPAC 曲线均为修正后的曲线。

根据图 4 所示，随着变压器油老化程度的增加，其内部的极性分子数量增多，温度升高后介质内极性分子运动速率变快，RPAC 增加；且在变压器油严重老化后，全频段内的 RPAC 的增加率减小，主要由于严重老化的变压器油黏度增加，阻碍了变压器油内载流子的运动，但总体介质内的极性分子的数量仍大幅增加，RPAC 曲线有增加趋势。



(a) 油纸绝缘试样介电性能测试平台



(b) 变压器缩比模型介电性能测试平台

图 2　测试平台示意图

Fig.2　Schematic diagram of test platform

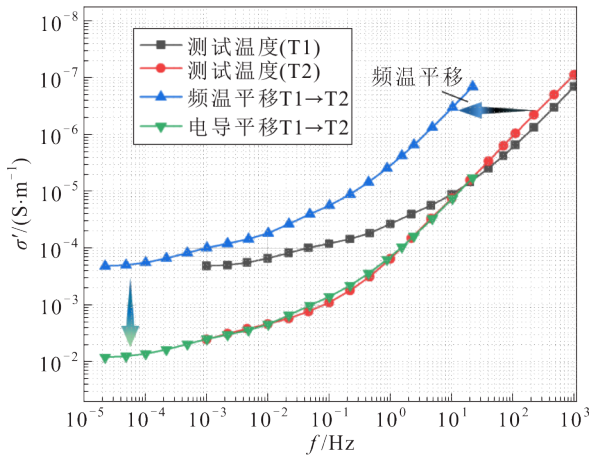


图 3　交流电导率平移曲线

Fig.3　RPAC translation curve

表 3　不同老化程度变压器油直流电导率

Table 3　DC conductivity of transformer oil

老化天数/d	直流电导率/(S·m^{-1})		
	30 ℃	60 ℃	90 ℃
0	2.09×10^{-13}	2.34×10^{-13}	1.01×10^{-12}
5	3.34×10^{-13}	1.03×10^{-12}	1.22×10^{-11}
10	1.63×10^{-12}	4.06×10^{-12}	1.38×10^{-11}
30	1.74×10^{-12}	7.34×10^{-12}	2.07×10^{-11}

在后续对多参数耦合方程组进行反演计算时，需要变压器油 RPAC 曲线，及其对应的可表征变压器油老化程度的量化指标。基于此，本文开展了变压器油黏度测试，以变压器油黏度表征其老化程度，

表 4 不同老化程度变压器油极低频交流电导率

Table 4 Extremely low frequency RPAC of transformer oil

老化天数/d	交流电导率/(S·m^{-1})		
	30 ℃	60 ℃	90 ℃
0	4.99×10^{-14}	6.91×10^{-14}	2.87×10^{-13}
5	9.49×10^{-14}	2.91×10^{-13}	3.55×10^{-12}
10	4.63×10^{-13}	8.99×10^{-13}	3.23×10^{-12}
30	7.94×10^{-13}	2.70×10^{-12}	6.04×10^{-12}

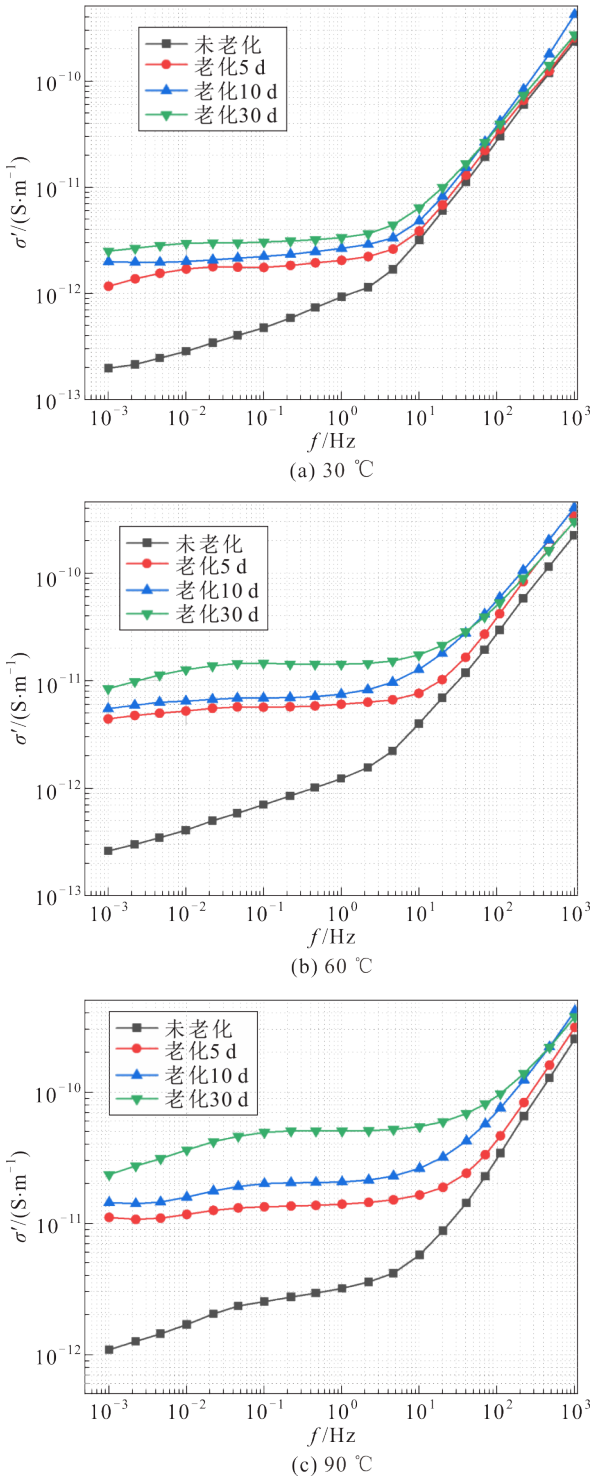


图 4 变压器油交流电导特性

Fig.4 RPAC characteristic of transformer oil

试验中采用美国 Brookfield 生产的 DV-II+Pro 旋转黏度计，精度为±1.0%，根据转子扭矩阻力测定法变压器油黏度的变化，变压器油黏度测试结果如图 5 所示。

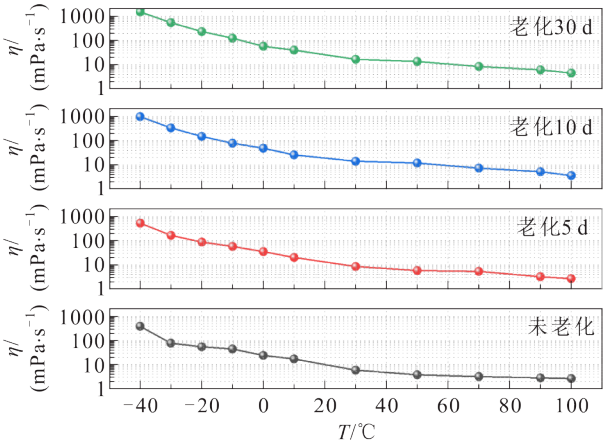


图 5 不同老化程度变压器油黏度测试结果

Fig.5 Viscosity test results of transformer oil with different aging

3.3 油浸纸板交流电导特性变化规律

为了揭示水分含量、测试温度对老化油浸纸板交流电导特性的影响规律，本文在 30、60、90 ℃测试温度下，对不同受潮程度的老化油浸纸板试样进行了频域介电响应测试及直流电导率测试，与上述变压器油分析方式相同，采用双平移的方法获得了油浸纸板的极低频 RPAC，根据式(4)，修正计算得到的 RPAC 曲线如图 6、7、8 所示。

由图 6、7、8 分析可知，油浸纸板老化后，其内部纤维素分子解裂，产生化学衍生物，使得介质中的载流子的浓度增加，介质内导电能力增强，交

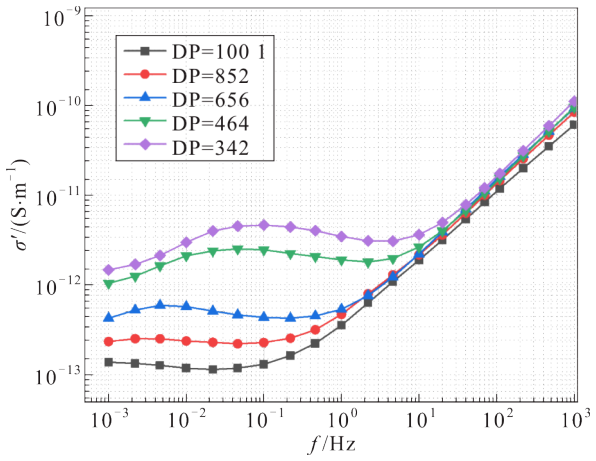
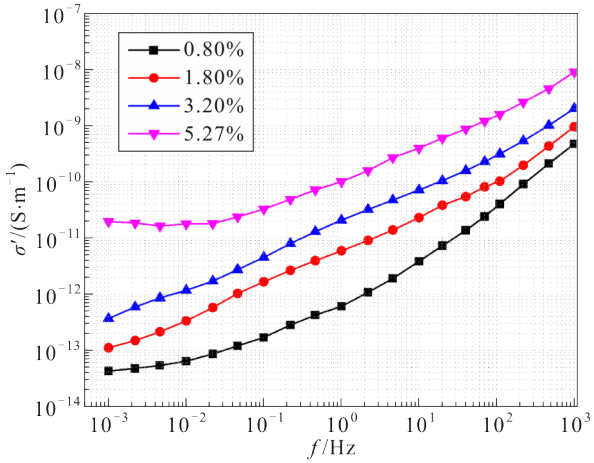
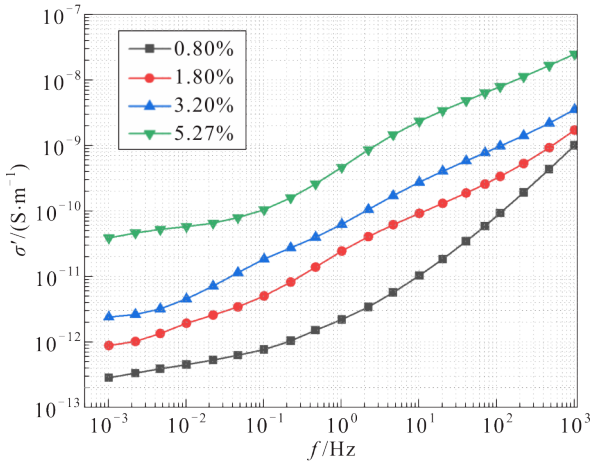


图 6 老化程度对油浸纸板交流电导率变化的影响(30 ℃)

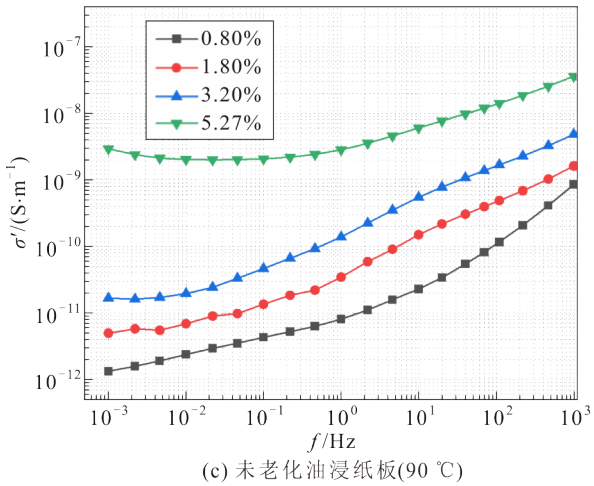
Fig.6 Influence of aging for RPAC of OPI samples(30 ℃)



(a) 未老化油浸纸板(30 ℃)



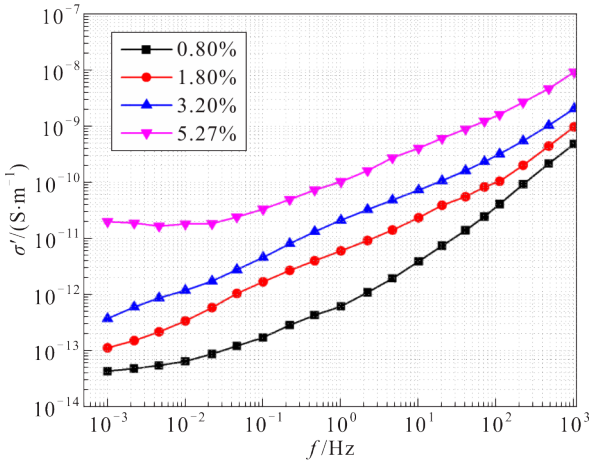
(b) 未老化油浸纸板(60 ℃)



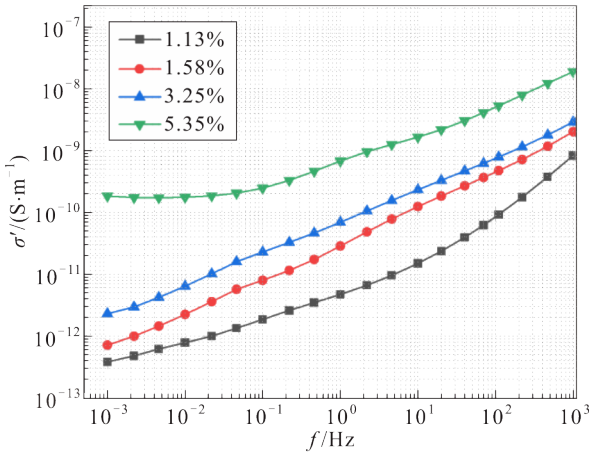
(c) 未老化油浸纸板(90 ℃)

图 7　测试温度对受潮油浸纸板交流电导率变化的影响

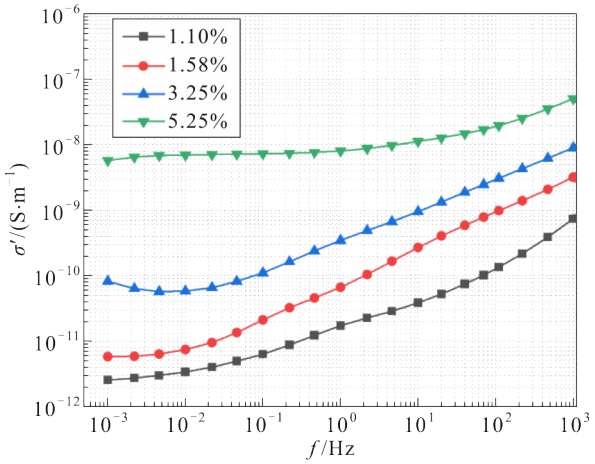
Fig.7　Influence of test temperature for RPAC of damp OPI samples



(a) 未老化油浸纸板(30 ℃)



(b) 老化5天油浸纸板(30 ℃)



(c) 老化35天油浸纸板(30 ℃)

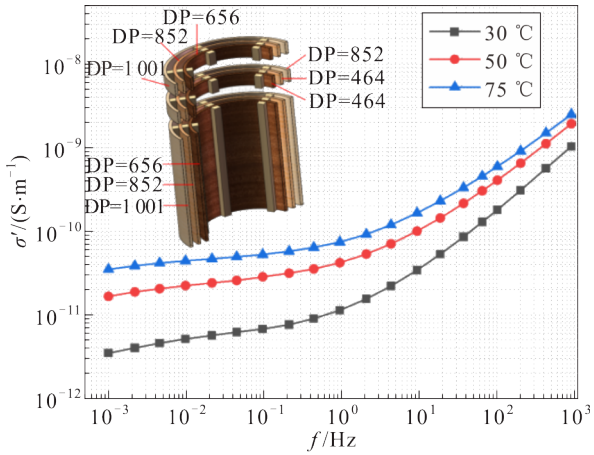
图 8　受潮程度对老化油浸纸板交流电导率变化的影响

Fig.8　Influence of moisture content on RPAC of OPI samples

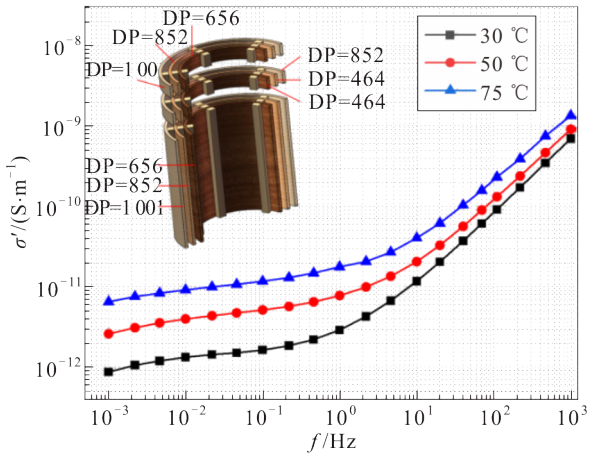
流电导率增加。且由于水分子为强极性分子，水分含量增加使得油纸界面的极化强度增加，因此在低频段，水分含量变化对其影响更大，当水分含量超过 5%后，RPAC 值出现数量级的改变。对比先前研究[29]，在高频段水分对 RPAC 的影响明显高于老化，因此可为后文评估变压器绝缘薄弱点时确定变压器含水量提供理论支撑。

3.4　油浸式变压器局部绝缘老化状态评估方法

本文对非均匀老化缩比模型进行了 FDS 测试及直流电导率测试，获得的 RPAC 测试结果如图 9 所示。



(a) 模型1交流电导率曲线



(b) 模型2交流电导率曲线

图 9 不均匀老化缩比模型交流电导率曲线

Fig.9 RPAC curves of NUA scaled models

本文通过这两种不均匀老化程度的测试结果，模拟不同运行年限下变压器出现的老化状态，以此测试结果作为后续评估方法的验证曲线。

为了扩大多参数耦合方程的输入数据量，本文将主成分分析法(principal component analysis, PCA)结合生成对抗网络(generative adversarial network, GAN)，实现油浸纸板、变压器油 RPAC 曲线/数据的扩充，曲线扩充过程如图 11 所示。相应的在实验室环境下对部分老化程度试样进行测试，其测试结果与扩充曲线结果一致，如图 10 所示。进一步证明了本文扩充方式的准确性。

同时本文采用粒子群算法(PSO)结合遗传算法(genetic algorithm, GA)对多参数耦合方程进行求解。根据迭代进程，动态调整惯性权重 w (该参数与迭代次数密切相关，迭代初期使用较大的权重增强全局搜索能力，而后期逐渐减小权重以加强局部搜索能力)，增强该方法在全局搜索能力，PSO-GA 的

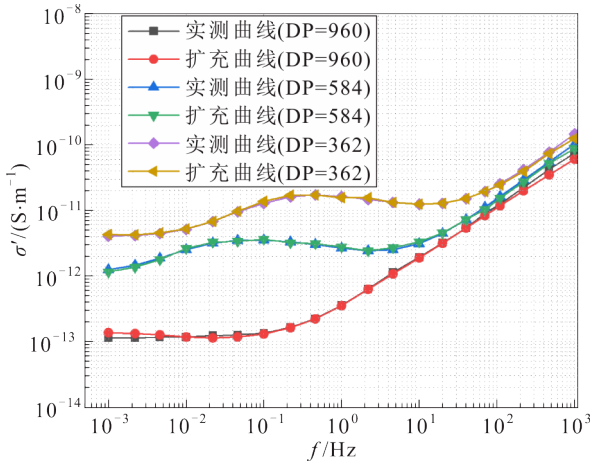


图 10 扩充数据与实测数据对比

Fig.10 Comparison of expanded data with measured data

分析原理如图 12 所示。

由前文分析可知，相较于水分含量，老化程度对 OIP 材料高频段 RPAC 影响极小，因此可以采用高频段电导率曲线进行水分含量计算。本文采用不同水分含量未老化的油浸纸板 RPAC 作为基础数据，结合式(10)，通过与实测模型高频段 RPAC 曲线对比，获得模型的平均含水率。根据计算，图 8 中两组非均匀老化模型的平均含水率分别为 1.74%、1.68%。

通过本文提出的电导率数据扩展方法，获取水分含量为 1.74%、1.68%不同老化程度的油浸纸板 RPAC 数据，以缩比模型 RPAC 作为目标值，将不同频率点下的耦合方程式(10)转变为式(11)，采用 PSO-GA 对其进行迭代反演计算。当式(11)小于 10^{-16} 时停止迭代，得到反演计算结果(缩比模型各局部位置的 RPAC，即可得到模型各局部位置的老化程度)。

$$\left(\frac{\ln\dfrac{r_7}{r_1}}{6}\sum_{i=1}^{3}\left(\frac{n_1 p_{1i}}{q_{1i}}+\frac{n_2 p_{2i}}{q_{2i}}+\frac{(1-n_1-n_2)p_{3i}}{q_{3i}}\right)-\gamma_n\right)_{\min}=0 \tag{11}$$

为验证本文构建的主绝缘模型 RPAC 模型的有效性，首先根据各局部油浸纸板 RPAC 数据，计算两种不均匀老化缩比模型的 RPAC 曲线，见图 13，全频段内的计算结果与实测结果误差极小，即本文构建的主绝缘模型 RPAC 模型有较高的准确性。

根据多参数耦合方程可知，不同频率点下均能够得到反演计算结果，但与实测曲线的拟合优度存在较大差异，图 13 中给出了不同频率点下反演计算结果的对比。

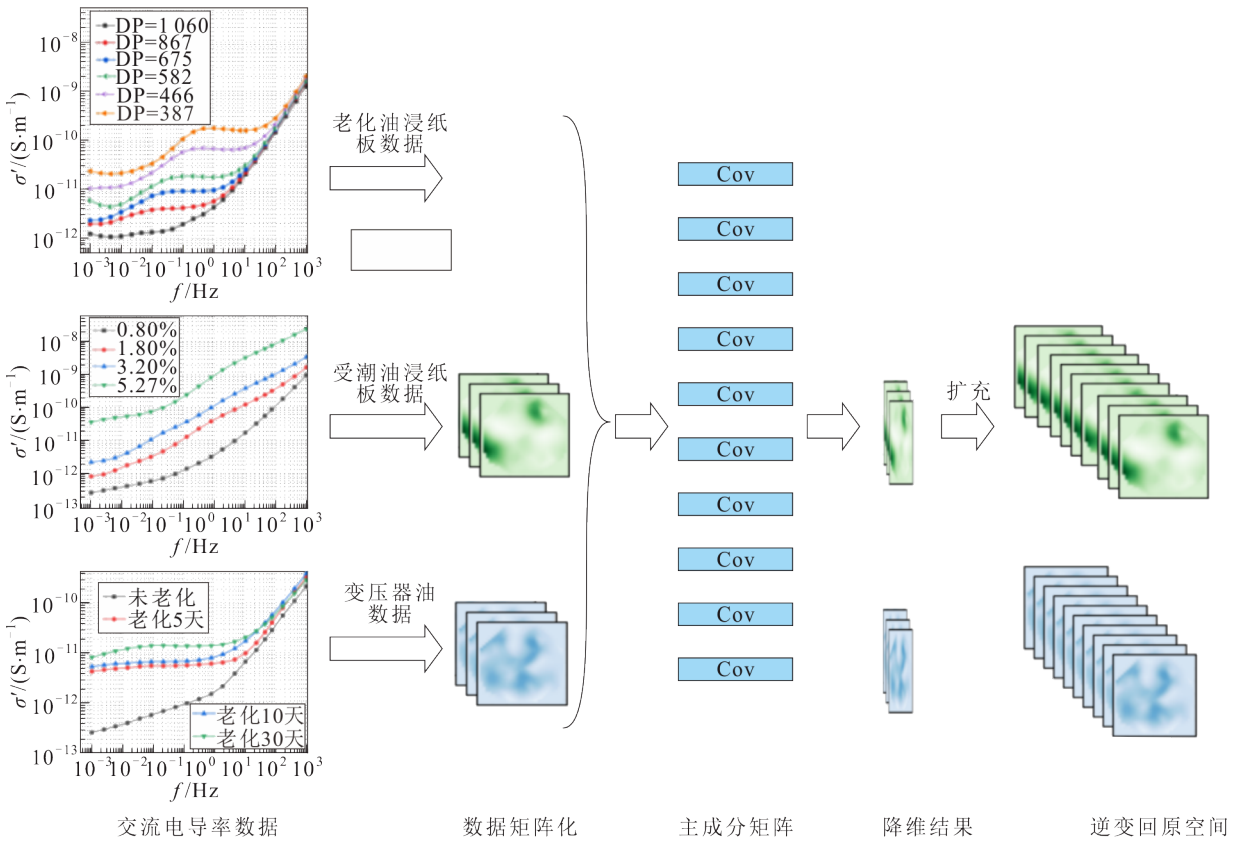


图 11　基础电导率曲线数据扩充原理图

Fig.11　Schematic diagram of RPAC curve data augmentation

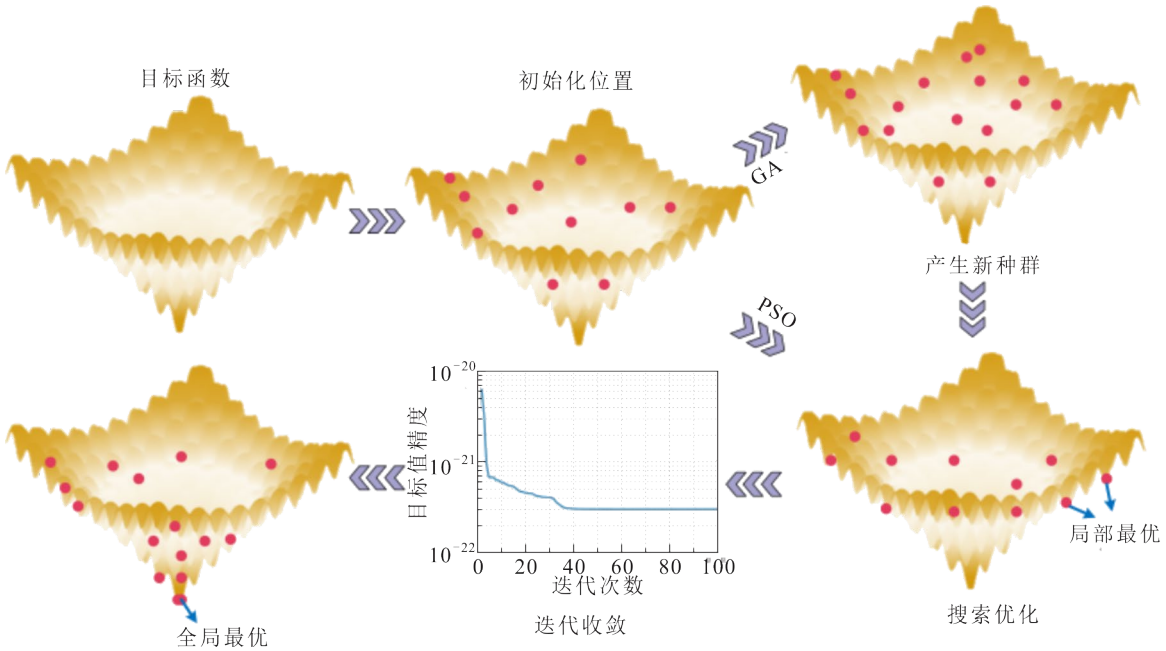
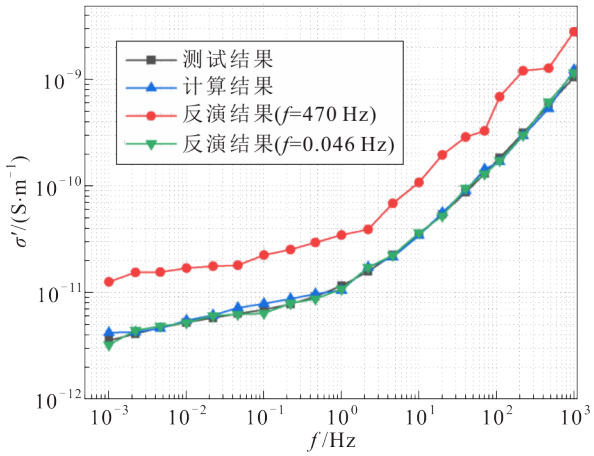


图 12　PSO-GA 算法原理图

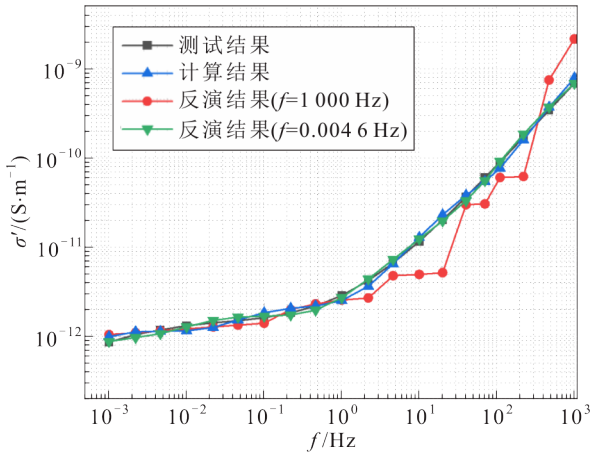
Fig.12　Schematic diagram of PSO-GA algorithm

由计算结果可知，0.046 Hz 频率点为模型 1 的最优反演频率点，输出的缩比模型局部最小聚合度 DP 为 479、油黏度为 17.6 mPa·s。0.022 Hz 和 0.004 6 Hz 频率点为模型 2 的最优反演频率点，0.022 Hz 频率点输出的缩比模型局部最小聚合度 DP 为 454、油黏度为 13.2 mPa·s；0.004 6 Hz 频率点输出的缩比模型局

部最小聚合度为DP为459、油黏度为13.6 mPa·s。



(a) 模态1



(b) 模态2

图 13 计算与实测缩比模型的交流电导率对比曲线

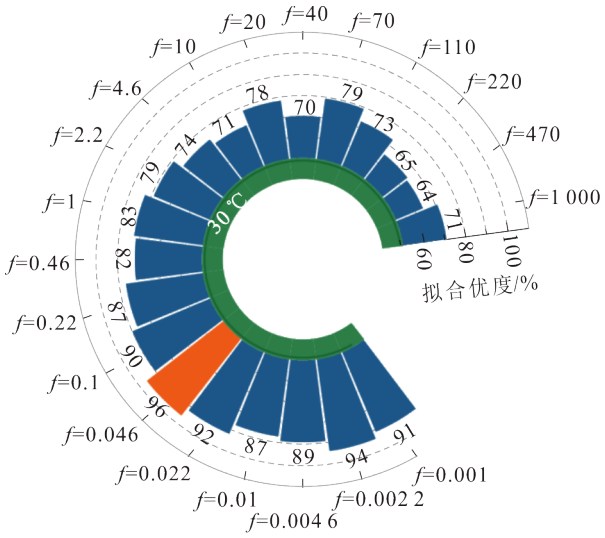
Fig.13 Comparison of calculated and measured RPAC curves of scale models

为对比不同频率点下反演计算结果的准确性，本文通过式(12)计算各频率点下实测曲线与理论计算曲线的拟合优度，如图 14 所示。

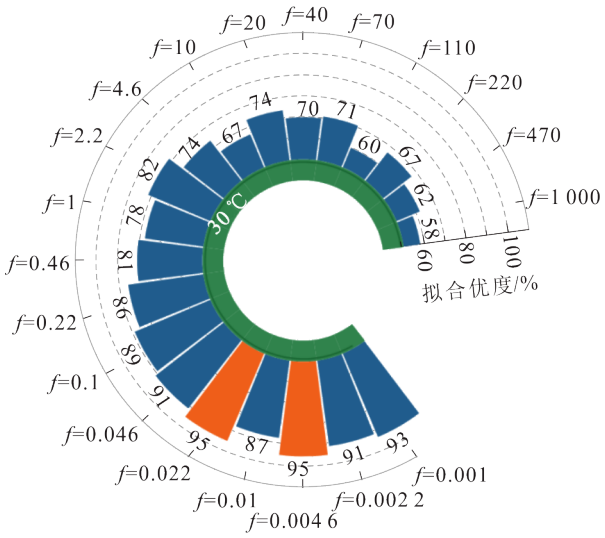
$$R^2=\left(1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(\gamma_i-\bar{\gamma}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(\hat{\gamma}_i-\bar{\gamma}_i)^2}\right)\times 100\% \tag{12}$$

式中：γ_i为第 i 个频率点下实测变压器缩比模型的RPAC 值；$\bar{\gamma}_i$为实测变压器缩比模型的 RPAC 值的平均值；$\hat{\gamma}_i$为第 i 个频率点下理论计算所得变压器缩比模型 RPAC 值；n 为频率点个数，本文选用的测试频率点数为 20。

根据计算结果可知，0.001~0.1 Hz 测试频率范围内的反演计算结果与实测结果拟合优度较高，为实现油浸式变压器内局部绝缘老化程度的准确评估，可以选取该频率段为特征频率段。



(a) 模型1计算与测试曲线的拟合优度



(b) 模型2计算与测试曲线的拟合优度

图 14 不同频率点反演计算结果的拟合优度

Fig.14 Goodness of fit of inversion calculation results at different frequency points

4 结论

1）随着测试温度及绝缘老化程度的增加，全频段内变压器油的 RPAC 曲线增加，且在其严重老化后，全频段内的 RPAC 增加率减小。

2）水分含量增加使得油纸界面的极化强度增加，低频段内水分含量变化对 RPAC 的影响更大，且当水分含量超过 5%后，RPAC 值出现数量级的变化。

3）基于变压器高低绕组主绝缘结构，构建了主绝缘等效电导模型，建立了多参数耦合方程组，并通过试验验证了该模型的有效性。

4）提出了基于介电响应数据自适应扩充的油浸式变压器局部绝缘老化状态评估方法，实现了多参数耦合方程组的求解，在 0.001~0.1 Hz 频率范围内，求解结果与实测结果拟合度高。

5）现阶段对于缩比模型各部分绝缘的水分含量为平均水分含量，而实际不均匀老化后 OIP 材料的缩水能力不同，使得水分含量存在差异，因此后续本文在算法优化上将考虑各部分水分含量不同对评估结果的影响，进一步提高模型的适用性。且对于实际变压器，其主绝缘内部的油纸绝缘界面远大于试验模型结构，为进一步消除油纸界面极化特性对其 FDS 响应曲线的影响，本课题组预定制 35 kV 可拆卸式油浸式变压器(可自主定制主绝缘结构比例关系)，并在该比例下制作单层及多层 XY 模型结构，三者均进行 FDS 测试，通过对比结果可进一步对简化模型计算方式进行修正，消除多层油-隔板界面数量对测试及评估结果产生的影响。

参考文献　References

[1] 李鹏，孙建涛，赵义焜，等. 大型油浸式变压器油箱防爆技术研究综述[J]. 中国电机工程学报，2025，45(9)：3282-3296.
LI Peng, SUN Jiantao, ZHAO Yikun, et al. Review on explosion-proof technology of large oil-immersed transformer tank[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(9): 3282-3296.

[2] 齐波，朱柯翰，罗远，等. 电力变压器健康状态智能感知与评估技术研究现状及未来展望[J]. 高电压技术，2025，51(8)：4395-4416.
QI Bo, ZHU Kehan, LUO Yuan, et al. Research status and future prospects of intelligent perception and evaluation technology for the health condition of power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 4395-4416.

[3] 汪可，李金忠，罗亮，等. 油浸式变压器电弧故障下油箱结构失效及改进加强研究综述[J]. 高电压技术，2025，51(7)：3379-3392.
WANG Ke, LI Jinzhong, LUO Liang, et al. Review on tank structural failure and improvement of oil-immersed transformers under arc faults[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(7): 3379-3392.

[4] 杨鸣，黄琳榆，孙金昊，等. 变压器类装备电磁暂态模型构建技术综述[J]. 高电压技术，2025，51(1)：1-20.
YANG Ming, HUANG Linyu, SUN Jinhao, et al. Review of transformer modeling technologies for electromagnetic transient analysis[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 1-20.

[5] 江长明，黄猛，郝震，等. 交流电压下油纸绝缘放电发展过程中电-磁-声特征参量的变化规律[J]. 高电压技术，2024，50(8)：3805-3813.
JIANG Changming, HUANG Meng, HAO Zhen, et al. Variation of electrical-magnetic-acoustic characteristic parameters during the development of oil-pressboard insulation discharge under AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3805-3813.

[6] 刘骥，吕佳璐，张明泽，等. 换油条件下变压器油纸绝缘老化寿命评估研究[J]. 高电压技术，2020，46(5)：1750-1758.
LIU Ji, LÜ Jialu, ZHANG Mingze, et al. Aging lifetime evaluation of transformer oil-paper insulation considering oil replacement[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1750-1758.

[7] FAN X H, LIU J F, ZHANG Y Y, et al. Polarization loss analysis and ageing characterisation of transformer oil-immersed insulation by using decoupled frequency domain spectroscopy[J]. High Voltage, 2022, 7(3): 575-585.

[8] 胡一卓，董明，谢佳成，等. 油纸绝缘宽频介电响应谱分析及等效模型研究[J]. 中国电机工程学报，2019，39(23)：7065-7073.
HU Yizhuo, DONG Ming, XIE Jiacheng, et al. Spectrum analyzing and modeling of wide-band frequency dielectric response of oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 7065-7073.

[9] 简政，郝建，刘清松，等. 典型缺陷油纸绝缘套管的高压频域介电和局部放电特性差异[J]. 高电压技术，2022，48(10)：4113-4123.
JIAN Zheng, HAO Jian, LIU Qingsong, et al. Difference analysis of high-voltage frequency domain dielectric and partial discharge characteristics of oil-paper insulation bushings with typical defections[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4113-4123.

[10] 谢佳成，董明，于泊宁，等. 宽频带油纸绝缘介电响应的全过程谱图提取和定量分析[J]. 中国电机工程学报，2021，41(5)：1547-1556.
XIE Jiacheng, DONG Ming, YU Boning, et al. Spectra extraction and quantitative analysis for all independent dielectric processes of oil-paper insulation in broad frequency band[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1547-1556.

[11] WU Z Y, ZHOU L J, LIN T, et al. A new testing method for the diagnosis of winding faults in transformer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(11): 9203-9214.

[12] LIU J F, WANG Q Y, FAN X H, et al. An improved geometric model for constructing frequency-domain spectroscopy of nonuniform aged oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(1): 317-325.

[13] 王国利，牛成林，王璐，等. 变压器材料的温度特性对绕组频率响应的影响[J]. 中国电机工程学报，2020，40(3)：999-1008.
WANG Guoli, NIU Chenglin, WANG Lu, et al. Effect of temperature properties of transformer materials on frequency response analysis of winding[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 999-1008.

[14] 杨峰，唐超，周渠，等. 基于等效电路的油纸绝缘系统受潮状态分析[J]. 电工技术学报，2020，35(21)：4586-4596.
YANG Feng, TANG Chao, ZHOU Qu, et al. Analyzing the moisture state of oil-paper insulation system using an equivalent circuital model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4586-4596.

[15] 张大宁，白帆，牛朝滨，等. 不同受潮类型下油纸绝缘套管的频域介电谱特性[J]. 中国电机工程学报，2018，38(16)：4942-4950.
ZHANG Daning, BAI Fan, NIU Chaobin, et al. Frequency domain spectroscopy characteristics of oil-paper insulated bushings under different damp types[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4942-4950.

[16] 杜林，冉鹂蔓，蔚超，等. 基于扩展德拜模型的油纸绝缘受潮频域特征量研究[J]. 电工技术学报，2018，33(13)：3051-3058.
DU Lin, RAN Liman, WEI Chao, et al. Study on frequency domain characteristics of moisture in oil-paper insulation based on extended debye model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3051-3058.

[17] 邹润豪，廖瑞金，郝建，等. 交流与交直流复合电压下“液-固”油纸绝缘体系界面电荷分布的仿真及推演模型研究[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1391-1402.
ZOU Runhao, LIAO Ruijin, HAO Jian, et al. Simulation and deduction model of interface charge distribution of "liquid-solid" oil paper insulation system under AC and AC/DC composite voltage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1391-1402.

[18] JIANG Z J, LIU J F, FAN X H, et al. Microscopic mechanisms analy-

sis of various dielectric response processes in oil-paper insulation with different insulating states[J]. High Voltage, 2024, 9(3): 591-600.

[19] HAO J, DAI X Z, YANG L J, et al. Physical mechanism analysis of conductivity and relaxation polarization behavior of oil-paper insulation based on broadband frequency domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(5): 1571-1578.

[20] ZHAO X T, LI Y P, REN L L, et al. High temperature ac conductivity relaxations in dielectric ceramics: grain boundary/intergranular phase effects[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2020, 31(19): 16468-16478.

[21] ZUKOWSKI P, KIERCZYNSKI K, KOLTUNOWICZ T N, et al. AC conductivity measurements of liquid-solid insulation of power transformers with high water content[J]. Measurement, 2020, 165: 108194.

[22] 张涛，张宁，江世杰，等. 基于改进分数 Poynting-Thomson 模型的油纸绝缘受潮状态评估[J]. 高电压技术，2022，48(3)：829-838.
ZHANG Tao, ZHANG Ning, JIANG Shijie, et al. Evaluation of oil-paper insulation moisture state based on improved fractional Poynting-Thomson model[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 829-838.

[23] 徐晴川，王圣康，林福昌，等. 基于频谱二阶斜率方均根的变压器油浸绝缘纸频谱提取[J]. 电工技术学报，2022，37(19)：4989-5002.
XU Qingchuan, WANG Shengkang, LIN Fuchang, et al. Frequency spectroscopy extraction of oil-immersed paper based on second-order gradient root mean square[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(19): 4989-5002.

[24] CHEN Z H, WU M, ZHAO R, et al. Machine remaining useful life prediction via an attention-based deep learning approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2521-2531.

[25] NGWENYAMA M K, GITAU M N. Application of back propagation neural network in complex diagnostics and forecasting loss of life of cellulose paper insulation in oil-immersed transformers[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 6080.

[26] 杨子坚，司马文霞，杨鸣，等. 融合流-热场耦合仿真与 EEMD-LSTM 网络的油浸式变压器热点温度快速预测方法[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1220-1232.
YANG Zijian, SIMA Wenxia, YANG Ming, et al. Rapid prediction method of hot spot temperature of oil-immersed transformer combining flow-thermal coupling simulation and EEMD-LSTM network[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1220-1232.

[27] 刘丰硕，汲胜昌，党永亮，等. 基于 C-MOEA/D 约束多目标优化算法的中频变压器绝缘结构全局优化设计方法[J]. 高电压技术，2025，51(2)：956-966.
LIU Fengshuo, JI Shengchang, DANG Yongliang, et al. Global optimal design method for insulation structure of medium frequency transformer based on constrained multiobjective optimization algorithm C-MOEA/D[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 956-966.

[28] 潘超，石晓博，刘春明，等. GIC/HVDC 对地电流入侵接地变压器的多场耦合与状态识别[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2349-2362.
PAN Chao, SHI Xiaobo, LIU Chunming, et al. Multi-field coupling and state identification of grounding transformers with GIC/HVDC ground current intrusion[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2349-2362.

[29] ZHANG M Z, SHAO D, LIU J, et al. Study on the change of the oil-paper insulation's AC conductivity characteristics based on dielectric response in frequency domain[J]. Measurement, 2025, 243: 116346.

[30] BADICU L V, GORGAN B, DUMITRAN L M, et al. Assessment of transformer mineral oil condition based on dc and ac conductivity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5): 1544-1551.

[31] HOMAGK C, MOSSNER K, LEIBFRIED T. Investigation on degradation of power transformer solid insulation material[C]//2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Quebec, Canada: IEEE, 2008: 75-78.

[32] SU X P, CHEN L, LIU Y, et al. A numerical method to calculate winding temperature distribution for oil immersed transformers[C]//2014 ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Poznan, Poland: IEEE, 2014: 1-4.

[33] 刘骥，张明泽，赵春明，等. 基于频域介电响应分频段优化计算的变压器油纸绝缘老化参数定量计算方法[J]. 电工技术学报，2020，35(9)：2020-2031.
LIU Ji, ZHANG Mingze, ZHAO Chunming, et al. Quantitative calculation method of transformer oil-paper insulation aging parameters based on frequency dielectric spectrum frequency range optimized calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9): 2020-2031.



张明泽
1992—，男，博士，副教授，硕导
主要从事高压电器绝缘性能诊断与性能评估及电抗器电磁结构优化设计的研究工作
E-mail: zhangmingze @hrbust.edu.cn

ZHANG Mingze
Ph.D.
Associate professor



邵　迪
1999—，男，硕士生
研究方向为变压器绝缘状态分析

SHAO Di



池明赫(通信作者)
1985—，男，博士，教授，博导
主要从事高电压绝缘结构电场调控与优化及高压电力设备绝缘检测与诊断的研究工作
E-mail: chiminghe1985@hrbust.edu.cn

CHI Minghe
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-04-28　在线出版日期　2025-09-26　　编辑　曹昭君